

# اصلاح برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های شنی کم‌بازده با استفاده از بنتونیت و نانوبنتونیت

## Modification of some physical and chemical properties of low productivity sandy soils using bentonite and nano-bentonite

### ABSTRACT

Given the considerable extent of low-yield desert lands in Iran, which generally have light-textured soils, it is essential to rehabilitate these lands to enhance soil productivity. Therefore, the primary objective of this study is to determine the optimal amounts of bentonite and nano-bentonite as natural soil amendments and to evaluate their effectiveness in improving the physical and chemical properties of sandy soil. In this study, each level of bentonite, including rates of 10, 20, and 30 ton ha<sup>-1</sup>, was applied in combination with nano-bentonite levels of 0.25, 0.75, and 2.5 ton ha<sup>-1</sup>. These experimental treatments were mixed with the soil and incubated for three months. The experiment was conducted in a completely randomized design with 10 treatments in three replications, and after the incubation period, some soil properties were measured and were analyzed using Minitab 16 software. Analysis of variance revealed that bentonite and nano-bentonite treatments had significant effects on soil CEC, ECE, BD, and SP. Clustering of the results further indicated that the treatments of 30 ton ha<sup>-1</sup> of bentonite plus 0.75 ton ha<sup>-1</sup> of nano-bentonite and 30 ton ha<sup>-1</sup> of bentonite plus 2.5 ton ha<sup>-1</sup> of nano-bentonite had the greatest impact on improving the physical and chemical properties studied. Considering the experimental data, statistical results, and clustering of the treatments, the application of B30\*NB2.5 was selected as the most suitable treatment for amending sandy soils in studied regions. This treatment effectively contributed to reducing BD, increasing SP, enhancing CEC and OC content, and lowering soil ECE.

**Keywords:** Clay and nanoclay, Soil improvement, Soil productivity, Superabsorbent

### چکیده

با توجه به وسعت قابل توجه اراضی بیابانی کم‌بازده در ایران که عموماً خاک با بافت سبک دارند، اصلاح این اراضی برای افزایش توان تولیدی خاک ضروری است. از این رو، هدف اصلی این مطالعه تعیین مقادیر بهینه بنتونیت و نانوبنتونیت به عنوان اصلاح‌کننده‌های طبیعی خاک و ارزیابی اثربخشی آن‌ها در بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک شنی است. در این پژوهش، هر یک از سطوح بنتونیت شامل مقادیر ۱۰، ۲۰ و ۳۰ تن در هکتار، به‌طور ترکیبی با سطوح نانوبنتونیت شامل مقادیر ۰/۲۵، ۰/۷۵ و ۲/۵ تن در هکتار با خاک مخلوط و برای مدت سه ماه خوابانده شدند. پژوهش با طرح آزمایشی کاملاً تصادفی شامل ۱۰ تیمار در سه تکرار انجام و پس از پایان دوره انکوباسیون، برخی خصوصیات خاک اندازه‌گیری و با استفاده از نرم افزار Minitab 16 تحلیل شدند. تجزیه واریانس داده‌ها نشان داد تیمارهای بنتونیت و نانوبنتونیت تأثیر معنی‌داری بر CEC، ECE، BD و SP خاک داشتند. خوشه‌بندی نتایج نیز نشان داد که تیمارهای ۳۰ تن بنتونیت به‌اضافه ۰/۷۵ تن نانوبنتونیت در هکتار؛ و ۳۰ تن بنتونیت به‌اضافه ۲/۵ تن نانوبنتونیت در هکتار بیشترین تأثیر را بر بهبود خصوصیات فیزیکی و شیمیایی مورد بررسی داشتند. با در نظر گرفتن نتایج داده‌های آزمایشی، نتایج آماری و خوشه بندی تیمارهای آزمایشی، کاربرد تیمار B30\*NB2.5 در هکتار به عنوان مناسب‌ترین تیمار برای اصلاح خاک‌های شنی مورد مطالعه انتخاب شد. این تیمار با کاهش BD و افزایش SP و ارتقای CEC و کاهش ECE خاک به‌طور مؤثری در اصلاح خاک شنی کمک کرد.

**واژه‌های کلیدی:** رس و نانورس، سوپرجاذب، اصلاح خاک، توان تولید خاک

بیابان‌ها پهنه گسترده‌ای از سطح کره زمین را در بر گرفته‌اند (Asadi et al., 2021). ایران با داشتن ۱/۲ درصد از کل خشکی‌های جهان، ۲/۴ درصد از پهنه‌های بیابانی بدون پوشش و ۳/۰۸ درصد از مناطق بیابانی جهان را در خود جای داده است. خشک‌سالی در ایران (با متوسط بارندگی سالانه ۲۴۰ میلی‌متر) یکی از مهم‌ترین چالش‌ها برای تولید محصولات زراعی به شمار می‌آید. ۶۱ درصد از مساحت ایران در اقلیم خشک و فراخشک قرار دارد، که این رقم ۳/۱ برابر میانگین جهانی (۱۹/۶ درصد) است. در تقسیم‌بندی زیست-بوم‌ها، ۴۳/۷ میلیون هکتار از اراضی ایران به عنوان اکوسیستم‌های بیابانی شناخته می‌شوند. از این مقدار، ۲۰ میلیون هکتار تحت تأثیر فرسایش بادی قرار دارد (سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری، ۱۴۰۰). تغییر اقلیم به همراه تغییرات آب و هوایی و سایر پدیده‌های شدید جوی تأثیر مستقیم بر کمیت و کیفیت تولیدات کشاورزی دارد (Adams et al., 1998; Maracchi et al., 2005; Tilman et al., 2002). خشک‌سالی به عنوان یکی از بحرانی‌ترین عوامل تأثیرگذار بر تولیدات کشاورزی در مناطق نیمه‌خشک و خشک شناخته می‌شود (Hussain et al., 2008). بارندگی طبیعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک معمولاً قادر به تأمین نیازهای آبی محصولات زراعی نیست (Deng et al., 2006).

در بسیاری از اراضی بیابانی و خشک، خاک‌ها دارای بافت شنی و درشت هستند. این نوع خاک‌ها دارای ظرفیت نگهداری آب پایین و زهکشی بالا هستند. در صورت عدم استفاده از اصلاح‌کننده‌های مناسب، توان تولید محصولات کشاورزی در این خاک‌ها به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. به منظور بهبود کیفیت این خاک‌ها، کشاورزان از مواد اصلاح‌کننده مختلفی بهره می‌برند. هدف اصلی استفاده از اصلاح‌کننده‌ها، ارتقاء حاصلخیزی خاک از طریق افزایش دسترسی گیاهان به مواد مغذی و آب، جلوگیری از خشک شدن خاک، افزایش فعالیت میکروبی در خاک و افزایش جذب عناصر غذایی توسط گیاهان است (Tu et al., 2006). اصلاح‌کننده‌های خاک به طور موثر می‌توانند با افزایش پایداری خاک‌دانه‌ها، اصلاح جرم مخصوص ظاهری و بهبود روابط آب و هوا، به اصلاح ساختمان خاک نیز کمک شایانی کنند (Tejada et al., 2009).

افزودن اصلاح‌کننده‌های طبیعی نظیر رس به خاک باعث حفظ آب و مواد مغذی می‌شوند که به آرامی در طول فصل رشد محصول آزاد شده، و به دنبال آن، ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک بهبود و بهره‌وری خاک را افزایش می‌دهد (Guiwei et al., 2006; Soda et al., 2008). علاوه بر این استفاده از این نوع اصلاح‌کننده‌ها، منجر به بهبود قابلیت نگهداری آب در خاک، کاهش تبخیر و تعرق، افزایش بهره‌وری مصرف آب و کود در محصولات کشاورزی، و در نهایت افزایش رشد و عملکرد محصول می‌شود (Hüttermann & Memmert, 2018; Narjary et al., 2012). استفاده از اصلاح‌کننده‌ها در خاک‌های فرسایش‌یافته، به دلیل داشتن مزایایی از جمله تأمین مواد غذایی و ماده آلی برای خاک (Doan et al., 2015)، پایداری خاک‌دانه‌ها و جلوگیری از جدا شدن آن‌ها (Wang et al., 2011)، افزایش خلل و فرج خاک و نفوذپذیری در آن (Gholami et al., 2015)، کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک (Jafari Haghighi, 2003) می‌توانند بطور قابل توجهی بر میزان عناصر پرمصرف تأثیرگذار باشند.

افزودن مقدار کافی ماده رسی به خاک شنی می‌تواند به طور قابل توجهی ارزش آن را از نظر کشاورزی بهبود بخشد. یکی از اصلاح‌کننده‌های مؤثر طبیعی، رس بنتونیت است که منشأ زمین‌شناسی دارد. برخلاف مواد آلی، این ماده به دلیل عدم زیست‌تخریب‌پذیری، برای اصلاح خاک‌های شنی مناطق خشک بسیار مناسب است. استفاده از بنتونیت منجر به بهبود ساختار و افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک می‌شود. گزارش‌های محدودی در رابطه با استفاده از رس بنتونیت در کشاورزی وجود دارد، اما پژوهش‌های قبلی نشان داده است که این ترکیب نیز همانند سایر اصلاح‌کننده‌های خاک توانایی افزایش ظرفیت نگهداری آب در خاک را دارد (Gill et al., 2004; Mojid et al., 2012; Tahir & Marschner, 2016). اضافه کردن بنتونیت باعث افزایش ظرفیت ذخیره آب در خاک و همچنین هدایت هیدرولیکی اشباع در لایه سطحی خاک می‌شود (Mi et al., 2017). رس بنتونیت همچنین منجر به افزایش زیست‌توده در سطح زمین از ۲ درصد به ۳۹ درصد، افزایش عملکرد دانه از ۳ درصد تا ۲۰ درصد، و افزایش بهره‌وری مصرف آب در محصولات کشاورزی از صفر تا ۲۹ درصد می‌شود. در مطالعه Mi et al. (۲۰۱۷)، نتایج تأثیر تیمارهای مختلف بنتونیت (۰، ۶، ۱۲، ۱۸،

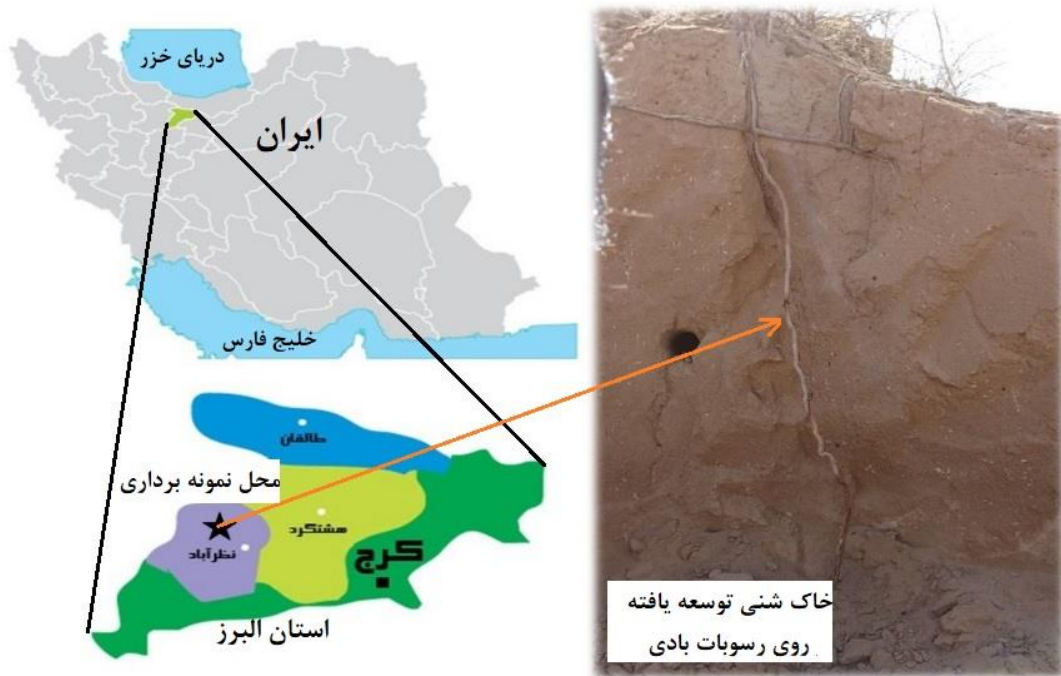
۲۴ و ۳۰ تن بنتونیت بر هکتار) بر برخی ویژگی‌های خاک نشان داد که استفاده از ۲۴ تن بنتونیت در هکتار بیشترین تأثیر را در طی پنج سال نشان داده، و موجب افزایش ذخیره آب در خاک و هدایت هیدرولیکی اشباع در لایه ۰ تا ۶۰ سانتی‌متری شد و تیمار ۳۰ تن بنتونیت در هکتار، بیشترین تأثیر را در سال پنجم آزمایش داشته است. همچنین تیمار ۱۸ تن بنتونیت در هر هکتار، بالاترین بازده اقتصادی را در طی پنج سال نشان داده است (Mi et al., 2017).

به دلیل امکان استفاده از نانومواد در صنایع مختلف از جمله کشاورزی و صنایع دارویی، این مواد در چند دهه گذشته به اهمیت بالایی دست یافته‌اند. نانومواد به ذراتی گفته می‌شود که حداقل در یک بعد اندازه‌ای کمتر از ۱۰۰ نانومتر دارند. ویژگی‌های بارز این نوع مواد شامل اندازه کوچک ذرات و سطح ویژه بسیار زیاد آن‌ها می‌باشد، که این ویژگی‌ها آن را از دیگر مواد تمایز می‌دهد (Calabi et al., 2009). مطالعات اخیر نشان داده‌است که استفاده از نانومواد در کشاورزی به‌عنوان یک روش پیشرفته، قادر است برای کاهش محدودیت‌های خاک و آب در مناطق خشک و نیمه خشک مؤثر باشد. به‌طور خاص، استفاده از نانورس‌ها به‌عنوان یک پیشران‌های پایدار برای خاک‌ها مورد آزمایش قرار گرفته است، به‌طوری‌که فرسایش بادی خاک تا ۹۹ درصد کاهش یافته است. علاوه بر این، نانورس به‌عنوان یک ماده هم‌آوری‌کننده ذرات عمل می‌کند و خاکدانه‌ها را تقویت کرده و مقاومت آن‌ها را در برابر فرسایش بادی به‌خصوص در شرایط آزمایشگاهی افزایش می‌دهد (Padidar et al., 2016). با توجه به انواع مختلف نانورس‌ها، نانورس مونت‌موریلونایت (که یک رس غالب در بنتونیت است) به دلیل ظرفیت تبدیلی کاتیونی بالا و فضای بین لایه‌ای فراوان، کاربردهای گسترده‌تری در اصلاح خواص خاک دارد. این نانورس می‌تواند با کاهش تراکم خاک، کاهش جرم مخصوص ظاهری و بهبود تخلخل خاک، قابلیت زراعی خاک را افزایش دهد (Shao & Terzopoulos, 2005). از طرف دیگر تراکم خاک بر تخلخل و ظرفیت نگهداری آب، اندازه و پایداری خاکدانه و در نتیجه حاصلخیزی خاک و رشد محصول تأثیرگذار است (Shi et al., 2002). با افزودن نانورس بنتونیت به خاک‌های شنی، افزایش نگهداری آب و بهبود ذخیره رطوبتی در خاک به دلیل افزایش سطح ویژه ذرات، خلل و فرج ریز، و ایجاد تعادل در نسبت توزیع اندازه ذرات ایجاد می‌شود (Padidar et al., 2016). بهره‌برداری از رس و نانورس به‌عنوان یک افزودنی مؤثر برای حفاظت از منابع آب و خاک در شرایط آزمایشگاهی، دستیابی به میزان و نسبت مناسب برای کاربرد آن در خاک‌های شنی اراضی بیابانی و به تبع آن استقرار و افزایش بهره‌وری گیاهان زراعی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است که تاکنون به آن پرداخته نشده است. با توجه به گسترش بیابان‌ها و تغییرات اقلیمی در ایران، نیاز فوری به اصلاح خاک‌های شنی و بازگرداندن آنها به چرخه تولید و بازتولید به چشم می‌خورد. برای دستیابی به این هدف، مطالعه و به‌کارگیری روش‌های نوین اصلاح خاک با استفاده از مواد اصلاح‌کننده مانند رس و نانورس ضروری است. از این‌رو، این مطالعه با هدف بهبود کیفیت خاک‌های شنی با استفاده از بنتونیت و نانوبنتونیت، به‌منظور اصلاح خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک برای افزایش بهره‌وری از منابع آب و خاک انجام گردید.

## مواد و روش‌ها

### نمونه برداری و آنالیزهای فیزیکی و شیمیایی خاک

خاک مورد استفاده در این پژوهش یک خاک شنی تشکیل شده بر روی رسوبات بادی غیر شور بوده که از روستای نجم‌آباد شهرستان نظرآباد استان البرز (شکل ۱) نمونه‌برداری شد. موقعیت جغرافیایی این خاک و برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن پیش‌تر توسط حیدری و همکاران (2024) گزارش شده است. پس از نمونه برداری، نمونه خاک به آزمایشگاه منتقل و پس از هوا خشک شدن از الک دو میلی‌متری عبور داده شد. اجرای این پژوهش با توجه به هدف آن، در چهار مرحله انجام شد که شامل نمونه‌برداری و انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، اعمال تیمارهای آزمایشی و انکوباسیون خاک، انجام آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در پایان دوره انکوباسیون و تجزیه و تحلیل داده‌ها است.



شکل ۱- موقعیت خاک مورد مطالعه در روستای نجم‌آباد شهرستان نظرآباد در استان البرز روی نقشه ایران

برخی از آزمایش‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، شامل تعیین جرم مخصوص ظاهری به روش استوانه فلزی (Blake & Hartge, 1986)، درصد رطوبت اشباع (Smith & Mullins, 1991)، pH و هدایت الکتریکی (EC) در عصاره اشباع خاک (Carter & Gregorich, 2007)، ظرفیت تبادل کاتیونی به روش استات سدیم ۱ نرمال (Sumner & Grotzinger, 1996)، توزیع اندازه ذرات رس و سیلت و جداسازی آن‌ها با توجه به قانون استوکس با روش رسوب و سیفون انجام شد (Bronick & Lal, 2005; Carter & Gregorich, 2007).

### تهیه نانوبنتونیت و کانی‌شناسی رس

رس بنتونیت مورد استفاده در این مطالعه از معادن استان زنجان تهیه شد و آزمایش‌های اولیه برای تعیین برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آنها انجام شد (جدول ۱). مقدار کربنات کلسیم معادل (CCE) نمونه بنتونیت مورد مطالعه ۱/۱۵ درصد و ظرفیت تبادل کاتیونی (CEC) آن برابر با ۴۲/۹۵ سانتی‌مول بار بر کیلوگرم بود. عصاره اشباع بنتونیت زنجان نیز دارای مقادیر بیشتر کاتیون‌های کلسیم ( $Ca^{2+} = 39 \text{ meq l}^{-1}$ ) و مقادیر کمتر سدیم ( $Na^+ = 20.87 \text{ meq l}^{-1}$ ) و منیزیم ( $Mg^{2+} = 17.5 \text{ meq l}^{-1}$ ) بود.

جدول ۱- برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی رس بنتونیت معدن زنجان

CEC	$SO_4^{2-}$	$CO_3^{2-}$	$Cl^-$	$Mg^{2+}$	$Ca^{2+}$	$K^+$	$Na^+$	CCE	بافت	رس	شن	سیلت	EC	pH
$cmol^+kg^{-1}$	$meq l^{-1}$							%						
۴۲/۹۵	۳۱/۶	۷/۳	۱۰/۱	۱۷/۵	۳۹	۴/۴۲	۲۰/۸۷	۱/۱۵	Clay	۶۴	۱۳	۲۳	۴/۹۳	۷/۷

نانوبنتونیت مورد استفاده نیز با استفاده از فرآیندهای پراکنده سازی و ترسیب متوالی در مزور یک لیتری در فواصل زمانی هشت ساعت و سیفون کردن ۱۰ سانتی‌متر بالایی سوسپانسیون تهیه شد. بر اساس قانون استوکس (۱۸۵۰) برداشت ۱۰ سانتی‌متر فوقانی پس از گذشت زمان ۸ ساعت شامل ذرات کوچک‌تر از ۲ میکرون (رس) می‌شود که حداقل در یک بعد دارای ابعاد نانو می‌باشند. به منظور

تهیه نانو رس بنتونیت، مقدار ۱۰۰ گرم رس بنتونیت به مزور یک لیتری اضافه شد. سپس به منظور پراکندگی بهتر ذرات، محلول ۵ درصد هگزا متا فسفات سدیم به میزان ۱۵ میلی‌لیتر به رس اضافه و با آب مقطر به حجم رسانده شد. سپس سوسپانسیون مزور با همزن برقی به صورت مکانیکی مخلوط گردید تا ذرات رس پراکنده شود. پس از هشت ساعت، محلول رویی مزور (ارتفاع ۱۰ سانتی‌متر بالایی) که حاوی ذرات رس کوچکتر از دو میکرون است، جمع‌آوری شد. در ادامه، مزور مجدداً با آب مقطر به حجم رسانده و مراحل جداسازی نانوبنتونیت تکرار شد. مراحل بالا با مقادیر اضافی بنتونیت تا زمان تولید نانورس کافی ادامه یافت. سپس، محلول کلرید منیزیم ۰/۱ مولار به‌عنوان عامل رسوب‌دهنده ذرات نانوبنتونیت به سوسپانسیون جمع‌آوری شده اضافه گردید (Kunze & Dixon, 1986; Soukup et al., 2008). پس از گذشت زمان لازم و رسوب کامل، محلول شفاف رویی با روش سیفون تخلیه و نانورس هم‌آوری شده، جمع‌آوری گردید. در نهایت، نانورس جدا شده در آون در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد خشک و برای انجام مراحل انکوباسیون ذخیره و نگهداری شد.

برای بررسی ویژگی‌های کانی‌شناسی نانو رس استخراج شده املاح محلول، آهک، کربن آلی و اکسیدهای آهن آزاد و به ترتیب توسط آب مقطر، استات سدیم یک مولار (pH=۵/۲)، آب اکسیژنه ۳۰ درصد و سترات دی‌تیونات بی‌کربنات (CDB) حذف شد (Kunze & Dixon, 1986). پراش‌نگاشت‌های نمونه‌های اشباع شده با منیزیم و پتاسیم همچنین نمونه‌های اشباع از منیزیم و خیس‌مانده شده در گلیسرول و نمونه‌های اشباع از پتاسیم و حرارت داده شده در دمای ۵۵۰ درجه سلسیوس با استفاده از دستگاه پراش پرتو ایکس Philips X'Pert Pro با اشعه CuK $\alpha$  ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ) در ولتاژ ۳۰ کیلو ولت و شدت جریان ۳۰ میلی‌آمپر تهیه شد.

## آزمایش انکوباسیون خاک

به‌منظور اصلاح خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک سنی، از ترکیب رس بنتونیت در سه سطح ۱۰، ۲۰ و ۳۰ تن بر هکتار و نانورس بنتونیت در سه سطح ۰/۲۵، ۰/۷۵ و ۲/۵ تن بر هکتار استفاده شد (جدول ۲). در این پژوهش، تیمارهای آزمایشی در سه تکرار و در مجموع ۳۰ تیمار آزمایشی استفاده شد. برای شروع آزمایش انکوباسیون، یک کیلوگرم خاک به گلدان‌های آزمایشی یک کیلوگرمی اضافه و وزن متناظر هر یک از تیمارهای آزمایشی ترکیب رس بنتونیت و نانوبنتونیت به خاک گلدان‌ها اضافه شد. سپس تیمارهای آزمایشی با خاک به خوبی مخلوط شد. انکوباسیون خاک برای مدت زمان ۱۲ هفته در گلخانه گروه علوم و مهندسی خاک دانشگاه تهران انجام شد. در طی دوره انکوباسیون، رطوبت خاک با اضافه کردن آب مقطر در ۱۰ درصد ظرفیت زراعی نگهداری شد. رطوبت خاک از طریق وزنی به صورت روزانه کنترل و اتلاف آب از طریق تبخیر و تعرق، با اضافه کردن آب مقطر برای رسیدن به رطوبت مورد نظر جبران شد. آزمایش انکوباسیون در دمای  $25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$  انجام شد.

جدول ۲- مشخصات کامل تیمارهای آزمایشی

شماره تیمار	مشخصات کامل تیمارهای آزمایشی	مخفف تیمار*
۱	۱۰ تن بنتونیت بر هکتار + ۰/۲۵ تن نانوبنتونیت بر هکتار	B10*NB0.25
۲	۱۰ تن بنتونیت بر هکتار + ۰/۷۵ تن نانوبنتونیت بر هکتار	B10*NB0.75
۳	۱۰ تن بنتونیت بر هکتار + ۲/۵ تن نانوبنتونیت بر هکتار	B10*NB2.5
۴	۲۰ تن بنتونیت بر هکتار + ۰/۲۵ تن نانوبنتونیت بر هکتار	B20*NB0.25
۵	۲۰ تن بنتونیت بر هکتار + ۰/۷۵ تن نانوبنتونیت بر هکتار	B20*NB0.75
۶	۲۰ تن بنتونیت بر هکتار + ۲/۵ تن نانوبنتونیت بر هکتار	B20*NB2.5
۷	۳۰ تن بنتونیت بر هکتار + ۰/۲۵ تن نانو بنتونیت بر هکتار	B30*NB0.25
۸	۳۰ تن بنتونیت بر هکتار + ۰/۷۵ تن نانوبنتونیت بر هکتار	B30*NB0.75
۹	۳۰ تن بنتونیت بر هکتار + ۲/۵ تن نانوبنتونیت بر هکتار	B30*NB2.5
۱۰	تیمار شاهد	B0NB0

\*حروف مخفف B و NB به ترتیب معادل رس بنتونیت و نانوبنتونیت است

## آنالیز آماری

به منظور تجزیه آماری داده‌های آزمایشگاهی از نرم‌افزار آماری Minitab 16 استفاده شد. در این پژوهش، از طرح کامل تصادفی با سه تکرار استفاده شد. نتایج حاصل از اثرات تیمارها روی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری و داده‌های آزمایشی با استفاده از تحلیل واریانس (ANOVA)، آزمون توکی، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و خوشه‌بندی تجزیه و تحلیل شدند و در نهایت بهترین تیمار از نظر بالاترین همبستگی به‌عنوان تیمار برتر انتخاب شد. از تحلیل ANOVA برای تعیین تفاوت معنی‌داری بین گروه‌ها و آزمون توکی برای شناسایی گروه‌ها که میانگین‌هایشان به طور معنی‌داری از یکدیگر متمایز هستند، استفاده شد. علاوه بر این، تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) برای کاهش ابعاد داده‌ها و شناسایی الگوهای اصلی در داده‌های پیچیده به کار رفت. تحلیل مؤلفه‌های اصلی این امکان را می‌دهد که متغیرهای وابسته را به چندین مؤلفه مستقل تبدیل کرده و الگوهای مختلف داده‌ها بهتر شناسایی شود و همچنین با ایجاد متغیرهای جدید و بدون همبستگی که بیشترین واریانس را در داده‌ها حفظ کرده و ساختار پیچیده داده‌ها را ساده‌تر می‌کند (Jolliffe & Cadima, 2016). در ادامه، از خوشه‌بندی برای دسته‌بندی داده‌ها بر اساس ویژگی‌های مشترک به گروه‌های مشابه استفاده شد.

## نتایج و بحث

### خصوصیات فیزیکی و شیمیایی اولیه خاک

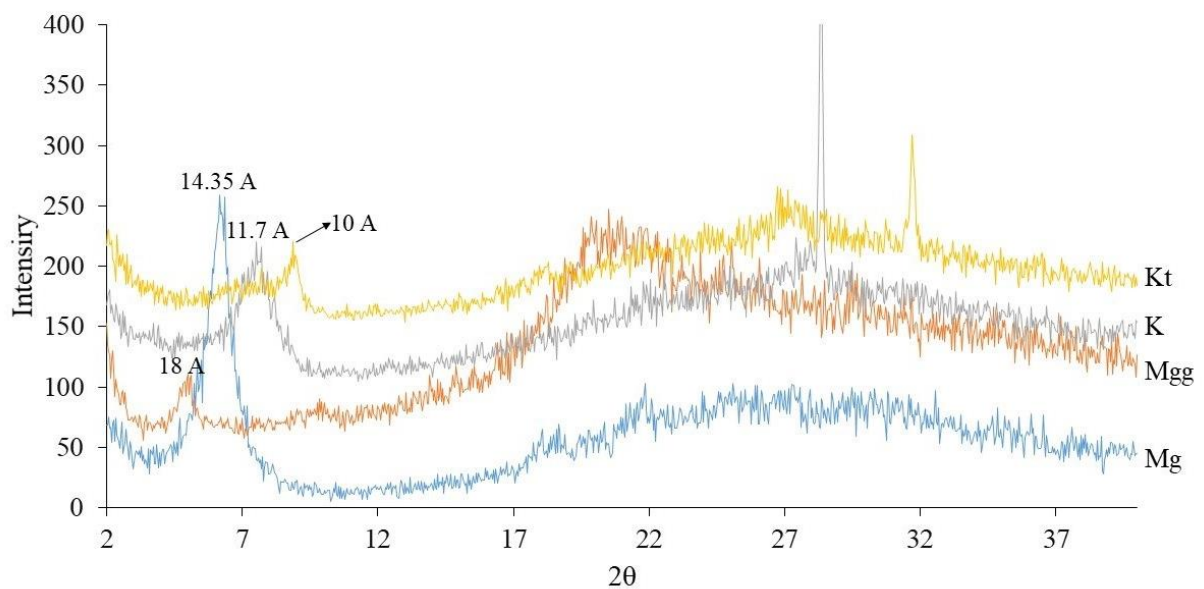
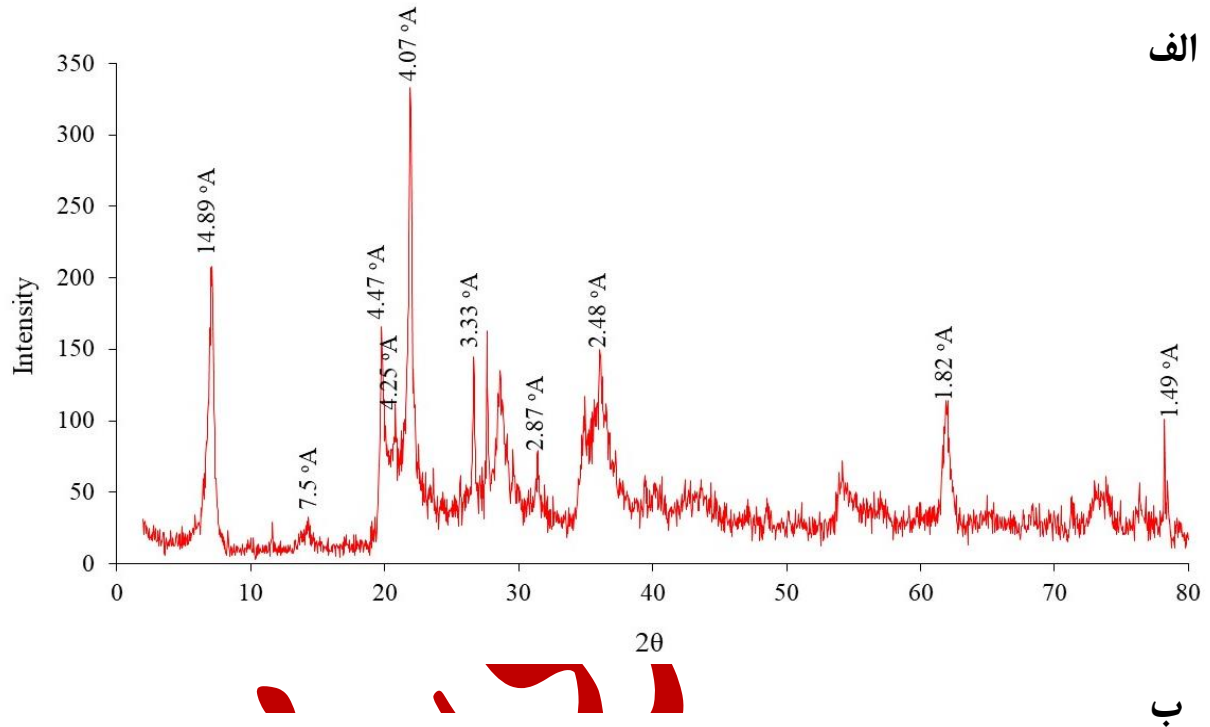
خاک شنی مورد بررسی دارای توزیع اندازه‌های ذرات ۸۴ درصد شن، ۵ درصد سیلت و ۱۱ درصد رس است. درصد بالای شن و جرم مخصوص ظاهری ۱/۶۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب خاک آزمایشی بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن تأثیر می‌گذارد؛ به طوری که موجب افزایش تخلخل کل و در نتیجه کاهش ظرفیت جذب و نگهداری آب در خاک شده است. از نظر خصوصیات شیمیایی، خاک آزمایشی با pH معادل ۸/۰۳، خاکی قلیایی است که ممکن است بر در دسترس بودن برخی مواد مغذی برای گیاهان تأثیر بگذارد. ظرفیت تبادل کاتیونی خاک (CEC) مورد بررسی به میزان ۳/۳۱ سانتی مول بار بر کیلوگرم بود، که خود به دلیل کمبود کربن آلی (۱۵٪ درصد) و مقادیر پایین درصد رس است (جدول ۳). کربن آلی نقش کلیدی در بهبود CEC دارد، زیرا مواد آلی به عنوان منبعی برای تبادل کاتیون‌ها عمل می‌کنند و به افزایش ظرفیت نگهداشت مواد مغذی در خاک کمک می‌کنند. به طور کلی، فراوانی بالای شن، pH قلیایی، کمی کربن آلی و وزن مخصوص ظاهری پایین در این خاک باعث کاهش ظرفیت نگهداری آب، کاهش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک و کاهش دسترسی مواد مغذی برای گیاهان می‌شود. این ویژگی‌ها بر کاهش کارایی خاک‌های شنی تأثیر گذاشته است.

### پراش اشعه X

با توجه به بررسی‌های بعمل آمده که مونت‌موریلونیت را رس غالب در بنتونیت معرفی نموده است (Junzhen and Edward, 2020) و در جهت تایید نوع رس خریداری شده و نانو رس استخراج شده، آزمایش کانی‌شناسی انجام شد. براساس نتایج به دست آمده از XRD پودری، بنتونیت معدن زنجان دارای سه پیک غالب ۱۴/۸۹، ۷/۵ و ۴/۴۷ انگستروم می‌باشد که وجود این پیک‌ها نشان‌دهنده این است که کانی‌های رس موجود در بنتونیت‌ها از خانواده اسمکتیت هستند (شکل ۲-الف). علاوه بر این کانی اولیه کوارتز نیز با پیک‌های ۴/۲۵، ۳/۳۳ و ۱/۸۲ انگستروم در این نمونه وجود دارد. چون بنتونیت یک کانی ناخالص است ممکن است کانی‌های دیگر هم به مقدار اندک وجود داشته باشد.

مطابق پراش‌نگاشت اشعه X نمونه نانو رس بنتونیت استخراج شده (شکل ۲-ب) وجود پیک نسبتاً قوی در محدوده ۱۴ Å در تیمار منیزیم و انتقال یافتن بخش اعظم از این رس‌های ۱۴ Å به محدوده ۱۸ Å پس از اعمال تیمار گلیسرول بیانگر وجود مقادیر بسیار زیادی کانی‌های خانواده مونت‌موریلونیت در این نمونه است. از سوی دیگر وجود پیک‌های مشخص در محدوده ۱۱/۷ Å در تیمار پتاسیم و ۱۰ Å در تیمار پتاسیم-حرارت تایید دیگری بر فراوانی زیاد رس مونت‌موریلونیت در نانو بنتونیت است (Whittig and

(Allardice, 1986) (شکل ۲-ب). ویژگی‌های کانی‌شناسی همانند وجود کانی‌های مونت موریلونیت بسیاری از خصوصیات مختلف خاک از جمله ظرفیت تبادل کاتیونی، سطح ویژه، ویژگی‌های عنصری و رفتار مکانیکی خاک‌های گسترده را کنترل می‌کنند (Mehta and Sachan, 2017). در مطالعه‌ای که ردی و همکاران (2020) بر روی خصوصیات انبساطی خاک‌های گسترده مختلف از مناطق متفاوت هند داشتند، دریافتند که نقش کانی‌های رسی مونت موریلونیت بر افزایش خاصیت انبساط خاک‌ها، بهبود خاکدانه‌سازی و مقاومت به فروپاشی بسیار حایز اهمیت است (Reddy et al., 2020).



**شکل ۲-** پراش نگاشت اشعه ایکس الف: نمونه رس بنتونیت معدن زنجان و ب: نمونه نانو رس بنتونیت استخراج شده (حروف مخفف A, Mg, Mgg, K و Kt به ترتیب معادل آنگستروم، تیمار اشباع با منیزیم، منیزیم گلیسرول، پتاسیم و پتاسیم حرارت می‌باشد)

## اثر بنتونیت و نانوبنتونیت بر خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک

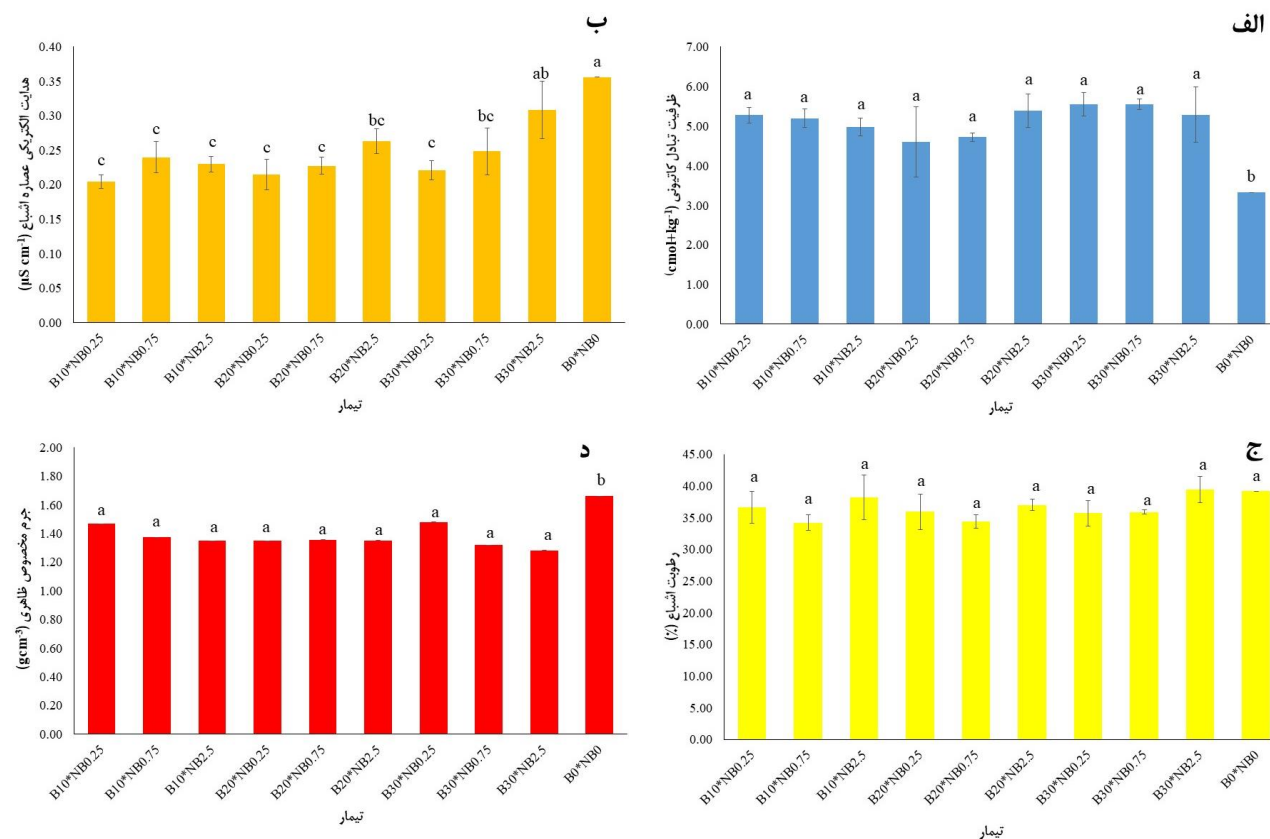
نتایج برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک در جدول ۳ و شکل ۳ ارائه شده است. ظرفیت تبادل کاتیونی خاک پس از اعمال تیمارهای رس بنتونیت و نانوبنتونیت، نسبت به تیمار شاهد ۱۷۰-۱۴۰ درصد افزایش یافته است. افزایش رس بنتونیت از ۱۰ تن در هکتار به ۳۰ تن در هکتار ظرفیت تبادل کاتیونی را به طور متوسط از ۵/۱۴ به ۵/۴۵ سانتی مول بر کیلوگرم خاک یعنی حدود ۶ درصد افزایش داد. علاوه بر این، نتایج آماری داده‌های آزمایشی (جدول ۳) نشان می‌دهد که ظرفیت تبادل کاتیونی خاک در تیمارهای آزمایشی در سطح اطمینان ۹۵ درصد تفاوت معنی‌داری با تیمار شاهد دارد. اضافه شدن رس بنتونیت و نانوبنتونیت به خاک آزمایشی موجب کاهش هدایت الکتریکی از ۱۵ تا ۴۵ درصد نسبت به تیمار شاهد در پایان دوره انکوباسیون شد. کمترین هدایت الکتریکی خاک در تیمار ۱۰ تن بنتونیت در هکتار با اضافه ۰/۲۵ تن نانوبنتونیت در هکتار به دست آمد که معادل ۰/۲ دسی‌زیمنس بر متر بود. هدایت الکتریکی خاک آزمایشی با افزایش مقدار نانوبنتونیت از ۰/۲۵ به ۲/۵ تن در هکتار، به ترتیب از ۰/۲۳ به ۰/۲۳ دسی‌زیمنس بر متر در تیمار ۱۰ تن بنتونیت در هکتار، ۰/۲۱ به ۰/۲۶ دسی‌زیمنس بر متر در تیمار ۲۰ تن بنتونیت در هکتار و ۰/۲۲ به ۰/۳ دسی‌زیمنس بر متر در تیمار ۳۰ تن بنتونیت در هکتار افزایش یافت.

از بین ویژگی‌های فیزیکی خاک، نتایج آزمایشگاهی جرم مخصوص ظاهری و رطوبت اشباع خاک در جدول ۳ و شکل ۳ ارائه شده است. داده‌های آزمایشی نشان می‌دهد جرم مخصوص ظاهری خاک پس از اعمال تیمارهای آزمایشی رس بنتونیت و نانوبنتونیت کاهش یافته است و کوچکترین جرم مخصوص ظاهری در تیمار ۳۰ تن رس بنتونیت با اضافه ۲/۵ تن نانوبنتونیت در هکتار مشاهده شد. علاوه بر این اعمال تیمارهای آزمایشی موجب افزایش رطوبت اشباع خاک شد به طوری که بالاترین درصد رطوبت اشباع خاک (۳۹/۳۷ درصد) در تیمار ۳۰ تن رس بنتونیت با اضافه ۲/۵ تن نانوبنتونیت در هکتار مشاهده شد.

جدول ۳- نتایج میانگین تکرارهای برخی خصوصیات فیزیکی و شیمیایی اندازه‌گیری شده در نمونه تیمارهای آزمایشی و شاهد

تیمار	جرم مخصوص ظاهری (gcm <sup>-3</sup> )	درصد رطوبت اشباع (درصد)	شن (درصد)	رس (درصد)	سیلت (درصد)	pHe	ECe (dS m <sup>-1</sup> )	ظرفیت تبادل کاتیونی (cmol+kg <sup>-1</sup> )
B10*NB0.25	۱/۴۷ <sup>a</sup>	۳۶/۶۳ <sup>a</sup>	۸۵/۸۶ <sup>a</sup>	۱۱/۰۹ <sup>a</sup>	۳/۰۵ <sup>a</sup>	۷/۸۶ <sup>a</sup>	۰/۲۰ <sup>c</sup>	۵/۲۷ <sup>a</sup>
B10*NB0.75	۱/۳۷ <sup>a</sup>	۳۴/۲ <sup>a</sup>	۸۲/۲۶ <sup>a</sup>	۱۱/۰۹ <sup>a</sup>	۶/۶۵ <sup>a</sup>	۷/۹۶ <sup>a</sup>	۰/۲۴ <sup>c</sup>	۵/۱۹ <sup>a</sup>
B10*NB2.5	۱/۳۵ <sup>a</sup>	۳۸/۲۱ <sup>a</sup>	۸۴/۰۶ <sup>a</sup>	۱۱/۰۹ <sup>a</sup>	۴/۸۵ <sup>a</sup>	۷/۸۹ <sup>a</sup>	۰/۲۳ <sup>c</sup>	۴/۹۷ <sup>a</sup>
B20*NB0.25	۱/۳۵ <sup>a</sup>	۳۵/۹۲ <sup>a</sup>	۸۲/۲۶ <sup>a</sup>	۱۰/۵۹ <sup>a</sup>	۷/۱۵ <sup>a</sup>	۷/۹۲ <sup>a</sup>	۰/۲۱ <sup>c</sup>	۴/۶۰ <sup>a</sup>
B20*NB0.75	۱/۳۶ <sup>a</sup>	۳۴/۳۹ <sup>a</sup>	۸۵/۸۶ <sup>a</sup>	۱۱/۶۱ <sup>a</sup>	۲/۵۳ <sup>a</sup>	۷/۸۵ <sup>a</sup>	۰/۲۲ <sup>c</sup>	۴/۷۱ <sup>a</sup>
B20*NB2.5	۱/۳۵ <sup>a</sup>	۳۶/۹۸ <sup>a</sup>	۸۳/۰۵ <sup>a</sup>	۱۱/۰۹ <sup>a</sup>	۵/۸۶ <sup>a</sup>	۷/۹۱ <sup>a</sup>	۰/۲۶ <sup>bc</sup>	۵/۳۹ <sup>a</sup>
B30*NB0.25	۱/۴۸ <sup>a</sup>	۳۵/۶۹ <sup>a</sup>	۸۳/۲۲ <sup>a</sup>	۱۱/۲۷ <sup>a</sup>	۵/۵۱ <sup>a</sup>	۷/۹۸ <sup>a</sup>	۰/۲۳ <sup>c</sup>	۵/۵۴ <sup>a</sup>
B30*NB0.75	۱/۳۲ <sup>a</sup>	۳۵/۸۶ <sup>a</sup>	۸۴/۸۵ <sup>a</sup>	۱۱/۶۱ <sup>a</sup>	۳/۵۴ <sup>a</sup>	۸/۰۲ <sup>a</sup>	۰/۲۴ <sup>bc</sup>	۵/۵۴ <sup>a</sup>
B30*NB2.5	۱/۲۸ <sup>a</sup>	۳۹/۳۷ <sup>a</sup>	۸۵/۸۶ <sup>a</sup>	۱۱/۰۹ <sup>a</sup>	۳/۰۵ <sup>a</sup>	۷/۹۴ <sup>a</sup>	۰/۳۰ <sup>ab</sup>	۵/۲۸ <sup>a</sup>
B0*NB0	۱/۶۶ <sup>b</sup>	۳۲/۱۴ <sup>a</sup>	۸۴/۰۶ <sup>a</sup>	۱۱/۰۹ <sup>a</sup>	۴/۸۵ <sup>a</sup>	۸/۰۳ <sup>a</sup>	۰/۳۵ <sup>a</sup>	۳/۳۳ <sup>b</sup>
حداقل	۱/۲۸	۳۲/۹۴	۸۲/۲۶	۱۰/۵۹	۲/۵۳	۷/۶۷	۰/۱۹	۳/۹۹
حداکثر	۱/۴۸	۴۱/۷۵	۸۵/۸۶	۱۱/۶۱	۷/۱۵	۸/۲۰	۰/۳۵	۵/۸۵
میانگین	۱/۳۷	۳۶/۳۶	۸۴/۱۳	۱۱/۲۰	۴/۷۰	۷/۹۲	۰/۲۴	۵/۱۷





**شکل ۳-** تغییرات الف: ظرفیت تبادل کاتیونی، ب: هدایت الکتریکی، ج: رطوبت اشباع خاک و د: جرم مخصوص ظاهری پس از اعمال تیمارهای رس بنتونیت و نانوبنتونیت در پایان دوره انکوباسیون.  
\*در هر تیمار، میانگین‌هایی که دارای حروف کوچک مشترک هستند براساس آزمون توکی از نظر آماری اختلاف معنی داری با هم ندارند.

جدول ۴ نشان می‌دهد که تیمار بنتونیت و نانوبنتونیت به‌عنوان اصلاح‌کننده در سطوح مختلف به‌طور قابل توجهی بر خصوصیاتی مانند جرم مخصوص ظاهری، رطوبت اشباع، EC عصاره اشباع و ظرفیت تبادل کاتیونی خاک شنی تأثیر گذاشته است. نتایج نشان داد که تأثیر تیمارها روی ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک متفاوت است. به‌طور خاص، تیمار ۳۰ تن بنتونیت با اضافه ۲/۵ تن نانوبنتونیت در هکتار (B30\*NB2.5) بر بسیاری از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک از جمله ظرفیت تبادل کاتیونی تفاوت معنی‌داری نشان داده است و روی برخی ویژگی‌ها از جمله ظرفیت تبادل کاتیونی، هدایت الکتریکی، جرم مخصوص ظاهری و رطوبت اشباع خاک تأثیرات قابل ملاحظه‌ای داشت. با توجه به این تأثیرات، تیمار B30\*NB2.5 در این پژوهش به‌عنوان گزینه‌ی مناسب برای اصلاح ویژگی‌های خاک شنی کم‌بازده انتخاب شد.

جدول ۴- جدول تجزیه واریانس برای بررسی تأثیر متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته

پارامتر	منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	نسبت واریانس
جرم مخصوص ظاهری	فاکتور (T)	۹	۰/۳۲۸	۰/۰۳۶	**
	خطا	۲۰	.	.	
	کل	۲۹	۰/۳۲۸		
درصد رطوبت اشباع	فاکتور (T)	۹	۸۸/۱۱	۹/۸۰۱	۲/۵۴
	خطا	۲۰	۷۷/۱۸۶	۳/۸۵۹	
	کل	۲۹	۱۶۵/۳۹۷		
pHe	فاکتور (T)	۹	۰/۱۰۶	۰/۰۱۱	۰/۶۹
	خطا	۲۰	۰/۳۴۳	۰/۰۱۷	
	کل	۲۹	۰/۴۴۹		
ECe	فاکتور (T)	۹	۰/۰۶۰	۰/۰۰۶	۱۴/۰۴
	خطا	۲۰	۰/۰۹۴	۰/۰۰۰۴	
	کل	۲۹	۰/۰۶۹		
ظرفیت تبادل کاتیونی	فاکتور (T)	۹	۱۱/۹۴۴	۱/۳۲۷	۷/۷۵
	خطا	۲۰	۳/۴۲۶	۰/۱۷۱	
	کل	۲۹	۱۵/۳۷۱		

\*\*برای پارامتر جرم مخصوص ظاهری، به دلیل صفر بودن خطا، نسبت واریانس نمی‌تواند محاسبه شود.

افزودن تیمار بنتونیت و نانوبنتونیت در تمامی سطوح به طور کلی باعث افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی شده است که در این میان، تیمار ۳۰ تن رس بنتونیت باضافه ۰/۷۵ تن نانوبنتونیت در هکتار موجب افزایش ۱۷۰ درصدی آن نسبت به نمونه‌ی شاهد شده است. بنتونیت به عنوان یک اصلاح‌کننده خاک شنی، باعث بهبود ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک می‌شود. این ماده ظرفیت تبادل کاتیونی، کربن آلی، و مواد مغذی ماکرو و میکرو را افزایش می‌دهد (Czaban et al., 2014; Czaban & Siebielec, 2013; Czaban et al., 2017). استفاده از بنتونیت در خاک‌های شنی، ضمن کاهش اتلاف آب از طریق نفوذ عمقی، از شستشوی مواد مغذی خاک جلوگیری می‌کند و به بهبود وضعیت آب در خاک کمک می‌کند (Abd El-Hady & Ebusam, 2016).

مطالعات متعددی نشان داده‌اند که بهبود ویژگی‌های فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک‌های شنی می‌تواند به افزایش بهره‌وری این خاک‌ها در کشاورزی کمک کند. به طور خاص، استفاده از اصلاح‌کننده‌های طبیعی مانند رس بنتونیت مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از این مواد می‌تواند ظرفیت تبادل کاتیونی خاک را افزایش دهد، و در نتیجه pH خاک را کاهش می‌دهد (جدول ۳). یکی دیگر از ویژگی‌های شیمیایی مؤثر در این پژوهش ECe می‌باشد که با توجه به داده‌های جدول ۳ و شکل ۳ و تحلیل آماری می‌توان نتیجه گرفت که افزودن اصلاح‌کننده‌های بنتونیت و نانوبنتونیت در تمامی سطوح موجب کاهش میزان ECe خاک شنی شده که در این میان تیمار ۱۰ تن بنتونیت و ۰/۲۵ تن نانوبنتونیت به میزان ۴۵ درصد میزان هدایت الکتریکی عصاره اشباع خاک را نسبت به تیمار شاهد کاهش داده است. افزودن بنتونیت و نانوبنتونیت به خاک شنی به دلیل افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی و جذب و نگهداری عناصر غذایی در خاک موجب کاهش هدایت الکتریکی می‌شود. در بین تیمارهای آزمایشی، تیمارهای آزمایشی با سطوح بالای رس بنتونیت و نانوبنتونیت (یعنی تیمارهای ۳۰ تن بنتونیت باضافه ۰/۷۵ تن نانوبنتونیت در هکتار و ۳۰ تن بنتونیت باضافه ۲/۵ تن نانوبنتونیت در هکتار) کمترین میزان کاهش هدایت الکتریکی را نسبت به خاک شاهد نشان دادند. رس بنتونیت به ویژه در شکل نانو سطح ویژه بسیار بالا و قابلیت تورم بالا در حضور آب دارد که سبب می‌شود که ذرات رس در خاک پخش شده و فضای خالی بین ذرات شنی را پر کنند. بدین صورت حرکت آب و نمک‌های محلول را محدود کرده و همچنین تعامل بنتونیت و نانوبنتونیت با ساختار فیزیکی خاک و تغییر در توزیع و تحرک یون‌ها، در نتیجه هدایت الکتریکی خاک کاهش پیدا می‌کند. نانوذرات در فواصل بین ذرات بزرگتر تجمع پیدا می‌کنند و از جریان در ماتریس جلوگیری می‌کنند (Wilson, 2012). ویژگی‌های نانوبنتونیت نشان می‌دهد که این ماده دارای یکنواختی بیشتر،

سطح بزرگتر، تخلخل بیشتر، ساختار با پیوندهای محکم‌تر، و تعداد بیشتری از سایت‌های جذب فعال است (Hend et al., 2016; Tayebee & Mazruy, 2018).

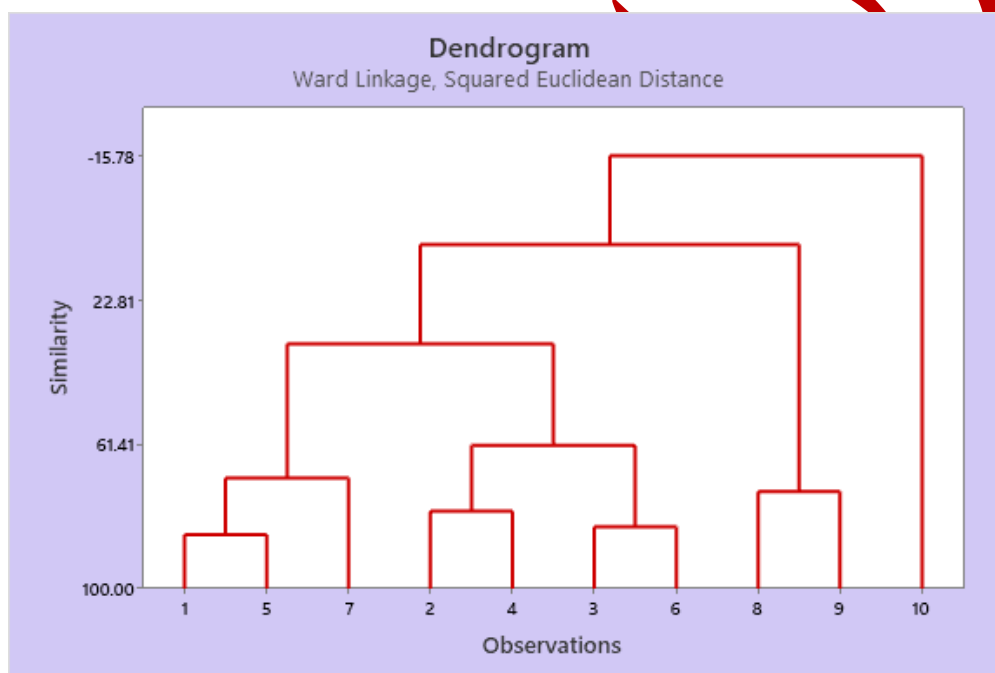
علاوه بر این افزودن بنتونیت و نانوبنتونیت با نسبت‌های مختلف به خاک شنی آزمایشی، وزن مخصوص ظاهری به طور میانگین ۱۷/۵ درصد کاهش یافت. از بین تیمارهای آزمایشی، تیمار ۳۰ تن رس بنتونیت باضافه ۲/۵ تن نانوبنتونیت در هکتار با ۲۳ درصد کاهش نسبت به تیمار شاهد، بهترین تأثیر را روی کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک شنی داشته است. بنابراین مقادیر بالای رس بنتونیت و نانوبنتونیت موجب بهبود خلل و فرج و ایجاد منافذ و شرایط تشکیل خاکدانه بیشتر در خاک شده و در نتیجه منجر به کاهش چگالی توده خاک می‌شود. افزایش زئولیت-بنتونیت به خاک موجب بهبود وزن مخصوص توده خاک و وضعیت تخلخل کل خاک شده است. مقادیر وزن مخصوص توده خاک با افزودن مقدار ۰، ۱/۵، ۲ و ۲/۵ تن در هکتار مخلوط زئولیت و بنتونیت به ترتیب به میزان ۳/۰، ۴/۲ و ۴/۲ درصد کاهش یافته‌اند، در حالی که مقدار تخلخل کل به ترتیب، ۵/۱، ۷ و ۱۲/۲ درصد افزایش یافت (Hassan & Mahmoud, 2013). در این مطالعه، تفاوت معنی‌داری در میزان ذرات شن، سیلت و رس نسبت به شاهد مشاهده نشد، هرچند تغییراتی در میزان رس، سیلت و شن نسبت به تیمار شاهد در مقادیر بالای استفاده از بنتونیت مشاهده گردید. احتمالاً در صورت اصلاح پی در پی خاک‌های شنی با رس بنتونیت و نانوبنتونیت، تغییرات توزیع اندازه‌های ذرات خاک مشهودتر خواهد شد. از طرف دیگر با مقایسه داده‌های آزمایشی می‌توان به این نتیجه رسید که بالاترین مقادیر بنتونیت و نانوبنتونیت یعنی ۳۰ تن رس بنتونیت باضافه ۲/۵ تن نانوبنتونیت در هکتار (B30\*NC5) اضافه شده به خاک شنی تأثیر مثبتی در ذخیره رطوبتی و افزایش درصد رطوبت اشباع خاک شنی داشته است، به گونه‌ای که مطابق شکل ۴ بررسی ویژگی‌های ظاهری به وضوح بیانگر افزایش میزان نگهداشت آب در خاک در نمونه‌های تیمار شده نسبت به نمونه‌های شاهد بود.



شکل ۴- تغییرات ظاهری نگهداشت آب در خاک تحت تیمار با اصلاح کننده‌های رس بنتونیت و نانوبنتونیت در مقایسه با تیمار شاهد

نتایج خوشه‌بندی مطابق با شکل ۵ نشان داد که داده‌ها دارای الگوهای ساختار قابل گروه‌بندی هستند. این الگوها می‌توانند به فهم بهتری از خصوصیات و ویژگی‌های مختلف تیمارها و پارامترهای مورد بررسی و همچنین ارتباط آن‌ها با یکدیگر کمک کنند. با استفاده از تحلیل خوشه‌ای و دندروگرام به دست آمده، متغیرهای خاک براساس همبستگی آن‌ها گروه‌بندی شدند. نتایج خوشه‌بندی، نشان‌دهنده همبستگی بالای بین مشاهدات و برخی از متغیرها است. در تحلیل مشاهدات، تیمارهایی که به هم نزدیک‌تر هستند (یعنی در مراحل اولیه به هم پیوسته‌اند)، بیشترین شباهت را با یکدیگر و تیمارهایی که در مراحل بعدی به هم پیوسته‌اند، فاصله‌ی بیشتری از هم داشتند. در نهایت تمامی تیمارها در یک خوشه‌ی بزرگ با یکدیگر ترکیب شدند که نشان دهنده وجود روابط بین

همه‌ی تیمارهاست. این خوشه‌ها می‌توانند نشان دهنده‌ی تأثیرات متفاوت بنتونیت و نانوبنتونیت بر ویژگی‌های مختلف خاک باشند. با تحلیل خوشه‌ها می‌توان تأثیر ترکیبات مختلف بنتونیت و نانوبنتونیت بر پارامترهای مختلف خاک را مقایسه نمود. علاوه بر این، با شناسایی تیمارهای بهینه در هر خوشه، می‌توان ترکیبات مؤثرتری از این تیمارها برای بهبود ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک پیدا کرد. دندروگرام ارائه شده در شکل ۵ نمایانگر روند ادغام خوشه‌ها بر اساس فاصله اقلیدسی است و به وضوح نشان می‌دهد که تیمارها چگونه در طی مراحل مختلف تحلیل خوشه‌ای گروه‌بندی شده و تغییرات در شباهت‌ها و تفاوت‌ها را به تصویر می‌کشد. بر این اساس، تیمار شاهد به‌طور قابل توجهی از سایر تیمارها جدا شده است و در یک خوشه‌ی مجزا قرار دارد (شکل ۵). این نتایج نشان می‌دهند که تیمار خوشه‌بندی، تیمارهای ۸ (B30\*NB0.75) و ۹ (B30\*NB2.5) به‌طور مجزا و با تفاوت‌های بارز از سایر تیمارها در یک خوشه قرار گرفتند.



شکل ۵- نمودار خوشه‌بندی خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک شنی پس از اعمال تیمارهای آزمایشی در پایان انکوباسیون و ارتباط آن‌ها با یکدیگر. (اعداد یک تا ۱۰ تیمارهای آزمایشی هستند که مشخصات آنها در جدول ۲ ارائه شده است.)

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثرات اصلاح‌کننده‌های بنتونیت و نانوبنتونیت بر برخی از خصوصیات فیزیکی و شیمیایی خاک‌های شنی مورد بررسی قرار گرفت. پس از یک جمع‌بندی و رتبه‌بندی بر اساس خبرگی و آزمون توکی، تجزیه به مؤلفه‌های اصلی و تجزیه خوشه بندی برترین تیمار برای اصلاح خاک شنی کم بازده انتخاب شدند. نتایج نشان داد که کاربرد بنتونیت و نانوبنتونیت با تأثیر بیشتر بر خصوصیات فیزیکی در مقایسه با خصوصیات شیمیایی خاک می‌توانند شرایط را برای بهبود کارایی خاک شنی و استقرار و رشد بیشتر گیاهان زراعی در مناطق خشک و نیمه خشک فراهم کنند. این اصلاح‌کننده‌ها به دلیل قابلیت‌های منحصر به فردشان در بهبود ساختار و بافت خاک، موجب افزایش ظرفیت نگهداری آب و کاهش جرم مخصوص ظاهری خاک شدند که این ویژگی‌ها می‌توانند به کاهش اثرات کم‌آبی و خشکسالی در این مناطق کمک کنند. علاوه بر این، با افزایش ظرفیت تبادل کاتیونی خاک، قابلیت نگه‌داشت

و تبادل مواد غذایی در خاک بهبود یافته و شرایط مساعدتری برای رشد گیاهان فراهم می‌شود، که این موضوع در تقویت حاصلخیزی خاک و استقرار پایدار گیاهان در اراضی شنی نقش مهمی دارد. همچنین کاهش هدایت الکتریکی خاک نشان‌دهنده اثر مثبت بنتونیت و نانوبنتونیت در کاهش شوری خاک و بهبود شرایط محیطی برای رشد گیاهان بوده است. این مطالعه، با ارائه شواهد علمی از اثربخشی بنتونیت و نانوبنتونیت، می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای پژوهش‌های آینده و همچنین به‌عنوان یک مبنای کاربردی و راهنمای عملی برای کشاورزان و پژوهشگران در توسعه روش‌های بهبود خاک‌های شنی کم‌بازده در مناطق خشک استفاده شود.

## منابع

سازمان جنگل‌ها، مراتع و آبخیزداری کشور، ۱۴۰۰. <http://frw.ir/02/fa/staticpages/page.aspx?tid=1502>

## REFERENCES

- Abd El-Hady, M., & Ebtisam, I. (2016). Effect of different soil conditioners application on some soil characteristics and plant growth. II-Soil evaporation and drywet cycles. *Int. J. ChemTech Res*, 9, 45-49.
- Adams, R. M., Hurd, B. H., Lenhart, S., & Leary, N. (1998). Effects of global climate change on agriculture: an interpretative review. *Climate research*, 11(1), 19-30.
- Blake, G., & Hartge, K. (1986). Particle density. *Methods of soil analysis: Part 1 physical and mineralogical methods*, 5, 377-382.
- Bronick, C. J., & Lal, R. (2005). Soil structure and management: a review. *Geoderma*, 124(1-2), 3-22.
- Calabi Floody, M., Theng, B. K. G., Reyes, P., & Mora, M. L. (2009). Natural nanoclays: applications and future trends – a Chilean perspective. *Clay Minerals*, 44(2), 161-176.
- Carter, M. R., & Gregorich, E. G. (2007). *Soil sampling and methods of analysis*. CRC press.
- Czaban, J., Czyz, E., Siebielec, G., & Niedzwiecki, J. (2014). Long-lasting effects of bentonite on properties of a sandy soil deprived of the humus layer. *International Agrophysics*, 28(3).
- Czaban, J., & Siebielec, G. (2013). Effects of bentonite on sandy soil chemistry in a long-term plot experiment (II); effect on pH, CEC, and macro-and micronutrients. *Polish Journal of Environmental Studies*, 22(6).
- Czaban, J., Siebielec, G., Czyz, E., & Niedzwiecki, J. (2013). Effects of Bentonite Addition on Sandy Soil Chemistry in a Long-Term Plot Experiment (I); Effect on Organic Carbon and Total Nitrogen. *Polish Journal of Environmental Studies*, 22(6).
- Deng, H.-x., Gong, X.-l., & Wang, L.-h. (2006). Development of an adaptive tuned vibration absorber with magnetorheological elastomer. *Smart materials and structures*, 15(5), N111.
- Doan, C. D., Van de Walle, D., Dewettinck, K., & Patel, A. R. (2015). Evaluating the oil-gelling properties of natural waxes in rice bran oil: Rheological, thermal, and microstructural study. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 92, 801-811.
- El Nagar, A., Osorio, D., Zyliniski, S., & Sait, S. M. (2021). Visual perception and camouflage response to 3D backgrounds and cast shadows in the European cuttlefish, *Sepia officinalis*. *Journal of Experimental Biology*, 224(11), jeb238717.
- Gholami, V., Chau, K. W., Fadaee, F., Torkaman, J., & Ghaffari, A. (2015). Modeling of groundwater level fluctuations using dendrochronology in alluvial aquifers. *Journal of hydrology*, 529, 1060-1069.
- Gill, S., Loprinzi, C. L., Sargent, D. J., Thomé, S. D., Alberts, S. R., Haller, D. G., Benedetti, J., Francini, G., Shepherd, L. E., & Francois Seitz, J. (2004). Pooled analysis of fluorouracil-based adjuvant therapy for stage II and III colon cancer: who benefits and by how much? *Journal of clinical oncology*, 22(10), 1797-1806.
- Guiwei, Q., De Varennes, A., & Cunha-Queda, C. (2008). Remediation of a mine soil with insoluble polyacrylate polymers enhances soil quality and plant growth. *Soil Use and Management*, 24(4), 350-356.
- Hassan, A., & Mahmoud, A. W. M. (2013). The combined effect of bentonite and natural zeolite on sandy soil properties and productivity of some crops. *Topclass Journal of Agricultural Research*, 1(3), 22-28.
- Heidari, A., Kordpour Kermanshahi, A., & Raheb, A. (2024). The glacial origin of carbonates in the calcic and petrocalcic horizons of the soils developed on glacial deposits in the southern Alborz Mountain slope. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(12), 1963-1979.
- Hend, H., Somia, B., Mohamed, A., Saeda, A., & Eman, R. (2016). Dynamic removal of cumulative toxic heavy metals Pb (II) and Cd (II) from aqueous solutions via activated nano-sized bentonite adsorbents. *Int. J. Contemp. Appl. Sci*, 3, 67-82.

- Hussain, A. I., Anwar, F., Sherazi, S. T. H., & Przybylski, R. (2008). Chemical composition, antioxidant and antimicrobial activities of basil (*Ocimum basilicum*) essential oils depends on seasonal variations. *Food chemistry*, 108(3), 986-995.
- Hüttermann, S., & Memmert, D. (2018). Effects of lab-and field-based attentional training on athletes' attention-window. *Psychology of Sport and Exercise*, 38, 17-27.
- Jafari Haghighi, M. (2003). Soil analysis methods: Sampling and important physical and chemical analyses. *Sari: Nedaye Zoha Press*.
- Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: a review and recent developments. *Philosophical transactions of the royal society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2065), 20150202.
- Kunze, G., & Dixon, J. (1986). Method of soil analysis, Part 1. *Physical and mineralogical methods*, American Society of Agronomy, Wisconsin, 568-577.
- Maracchi, G., Sirotenko, O., & Bindi, M. (2005). Impacts of present and future climate variability on agriculture and forestry in the temperate regions: Europe. *Climatic change*, 70(1), 117-135.
- Mi, J., Gregorich, E. G., Xu, S., McLaughlin, N. B., Ma, B., & Liu, J. (2017). Effect of bentonite amendment on soil hydraulic parameters and millet crop performance in a semi-arid region. *Field Crops Research*, 212, 107-114.
- Mojid, M., Wyseure, G., & Biswas, S. (2012). Requirement of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers for wheat cultivation under irrigation by municipal wastewater. *Journal of soil science and plant nutrition*, 12(4), 655-665.
- Natural Resources and Watershed Management Organization, 2021. <http://frw.ir/02/fa/staticpages/page.aspx?tid=1502>. (In Persian).
- Narjary, B., Aggarwal, P., Singh, A., Chakraborty, D., & Singh, R. (2012). Water availability in different soils in relation to hydrogel application. *Geoderma*, 187, 94-101.
- P Olesen, K., Shehata, S., Bondok, A., M El Nahrawy, S., & El-Kerdany, A. (2016). Response of Egyptian clover to Nano Clay Flakes in Newly Reclaimed Sandy Soils under Sprinkler Irrigation System. *Alexandria Science Exchange Journal*, 37(October-December), 759-770.
- Padidar, M., Jalalian, A., Asgari, K., Abdouss, M., Najafi, P., Honarjoo, N., & Fallahzade, J. (2016). The impacts of nanoclay on sandy soil stability and atmospheric dust control. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 81(4), 193-196.
- Semalulu, O., Elobu, P., Namazzi, S., Kyebogola, S., & Mubiru, D. (2017). Higher cereal and legume yields using Ca-bentonite on sandy soils in the dry eastern Uganda: increased productivity versus profitability. *J. Agric. Res*, 5(2), 140-147.
- Semalulu, O., Magunda, M., & Mubiru, D. (2015). Amelioration of sandy soils in drought stricken areas through use of Ca-bentonite. *Uganda Journal of Agricultural Sciences*, 10(2), 195-205.
- Shao, W., & Terzopoulos, D. (2005). Autonomous pedestrians. Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation,
- Shi, H., Quintero, F. J., Pardo, J. M., & Zhu, J.-K. (2002). The putative plasma membrane Na<sup>+</sup>/H<sup>+</sup> antiporter SOS1 controls long-distance Na<sup>+</sup> transport in plants. *The plant cell*, 14(2), 465-477.
- Smith, K., & Mullins, C. (1991). *Soil analysis*. Marcel Decker.
- Soda, M., Yasui, Y., Moyoshi, T., Sato, M., Igawa, N., & Kakurai, K. (2006). Magnetic structure of YBaCo4O7 with kagome and triangular lattices. *Journal of the Physical Society of Japan*, 75(5), 054707.
- Soukup, D. A., Buck, B. J., & Harris, W. (2008). Preparing soils for mineralogical analyses. *Methods of Soil Analysis Part 5—Mineralogical Methods*, 5, 13-31.
- Sumner, D. Y., & Grotzinger, J. P. (1996). Were kinetics of Archean calcium carbonate precipitation related to oxygen concentration? *Geology*, 24(2), 119-122.
- Tahir, S., & Marschner, P. (2016). Clay amendment to sandy soil—effect of clay concentration and ped size on nutrient dynamics after residue addition. *Journal of soils and sediments*, 16, 2072-2080.
- Tállai, M. (2011). Effect of Bentonite and zeolite on characteristics and change of microbial activity of acidic humic sandy soil. *Pol. J. Environ. Stud*, 26, 1-8.
- Tayebee, R., & Mazruy, V. (2018). Acid-thermal activated nanobentonite as an economic industrial adsorbent for malachite green from aqueous solutions. Optimization, isotherm, and thermodynamic studies. *Journal of Water and Environmental Nanotechnology*, 3(1), 40-50.
- Tejada, M., Hernandez, M., & Garcia, C. (2009). Soil restoration using composted plant residues: Effects on soil properties. *Soil and Tillage Research*, 102(1), 109-117.
- Tilman, D., Cassman, K. G., Matson, P. A., Naylor, R., & Polasky, S. (2002). Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), 671-677.

- Tu, H., Nelson, O., Bezprozvanny, A., Wang, Z., Lee, S.-F., Hao, Y.-H., Serneels, L., De Strooper, B., Yu, G., & Bezprozvanny, I. (2006). Presenilins form ER Ca<sup>2+</sup> leak channels, a function disrupted by familial Alzheimer's disease-linked mutations. *Cell*, 126(5), 981-993.
- Wang, W., Wang, S., Ma, X., & Gong, J. (2011). Recent advances in catalytic hydrogenation of carbon dioxide. *Chemical Society Reviews*, 40(7), 3703-3727.
- Wilson, A. (2012). Preliminary test results of nano-based fluids reveal benefits for field application. *Journal of Petroleum Technology*, 64(11), 104-108.
- Whittig, L. D., & Allardice, W. R. (1986). X-ray diffraction techniques. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, 5, 331-362.

## Modification of some physical and chemical properties of low productivity sandy soils using bentonite and nanobentonite

### EXTENDED ABSTRACT

#### Objectives

Drought and desertification are among the major environmental and agricultural challenges in Iran, exacerbated by inappropriate water consumption patterns and inadequate resource management. Over half of Iran's territory falls within arid and hyper-arid climates, which presents a significant challenge for the country and underscores the need for intelligent water resource management and land conservation, especially in areas with sandy and light soils' texture. A substantial portion of Iran's low-yield and desert lands (approximately 43 million hectares) consists of sandy soils with low productivity for crops production. Given the economic and environmental importance of utilizing these lands and the need to enhance their productive capacity, soil reclamation and management have become imperative. The primary aim of this study is to determine the optimal amounts of bentonite and nano-bentonite as soil amendments and assess their effectiveness in improving the physical and chemical properties of sandy soils. This study also seeks to develop a suitable formulation for the physical, chemical, and economic improvements of low-yield sandy soils and to identify the best treatment for soil enhancement.

#### Materials and Methods

This research utilized aeolian sandy soil samples collected from Najmabad village in Nazarabad County, Alborz Province. After collection, the soil samples were transferred to the laboratory, air-dried, and sieved through a 2-mm mesh. The soil treatments included bentonite at three levels (10, 20, and 30 tons per hectare) and nano-bentonite at three levels (0.25, 0.75, and 2.5 tons per hectare). Zanjan bentonite was used as the source material for extracting nano-bentonite. Nano-bentonite was prepared using the precipitation method, where particles were separated by manual stirring. The solution was then precipitated with magnesium chloride, and the nano-bentonite was dried and ground. Then, sandy soil was mixed with bentonite and nano-bentonite and the treated soil were incubated for 12 weeks at 25°C and 80% humidity. After this period, the physical and chemical properties of the soil, including bulk density, saturation moisture, pH, electrical conductivity (ECe) and cation exchange capacity (CEC) were determined. The study was conducted using a completely randomized design with 9 treatments and 3 replicates. The experimental data were analyzed using Minitab 16 software, applying statistical methods including Analysis of Variance (ANOVA), Tukey's test, Principal Component Analysis (PCA), and clustering. ANOVA and Tukey's test were used to identify significant differences between treatments, while PCA was employed for dimensionality reduction and pattern recognition. Clustering was utilized to group treatments based on similar characteristics.

#### Results

The analysis revealed that applying bentonite at 30 t ha<sup>-1</sup> and nano-bentonite at 2.5 t ha<sup>-1</sup> had significant and positive effects on soil properties. Specifically, this treatment resulted in increased cation exchange capacity (CEC) and saturation moisture, and reduced bulk density and electrical conductivity of saturation extract (ECe). ANOVA indicated significant differences between treatments concerning CEC, ECe, and bulk density. Additionally, clustering analysis showed that the combinations of 30 t ha<sup>-1</sup> of bentonite + 0.75 t ha<sup>-1</sup> of nano-bentonite and 30 t ha<sup>-1</sup> of bentonite + 2.5 t ha<sup>-1</sup> of nano-bentonite had the most substantial positive effects on the physical and chemical properties of the soil. These combinations notably improved cation exchange capacity, organic carbon content, soil moisture retention, and reduced bulk density.

#### Conclusion

The findings of this research demonstrate that the application of bentonite and nano-bentonite can effectively enhance the physical and chemical properties of sandy soils. In particular, the combination of 30 t ha<sup>-1</sup> of bentonite and 2.5 t ha<sup>-1</sup> of nano-bentonite was identified as the most effective treatment for improving low-productivity sandy soils. This treatment significantly increased cation exchange capacity, soil moisture retention, and decreased bulk density and electrical conductivity of saturation

extract. The results emphasize that using bentonite and nano-bentonite as soil amendments can be a highly effective strategy for improving the quality of sandy soils in arid and semi-arid regions and enhancing agricultural productivity in such environments.

**Keywords:** Clay and nanoclay, Soil improvement, Soil productivity, Superabsorbent.

#### **Author Contributions**

Conceptualization; Alireza Raheb and Ahmad Heidari; methodology, Alireza Raheb, Ahmad Heidari, Mostafa Abdollahpour, Khodabakhsh Goodarzvand Chegini and Hamidreza Mokhtari Esfidvajani; validation, Alireza Raheb and Ahmad Heidari ; formal analysis, Hadis Khosravian Chatroodi and Sara Talaei Khosrowshahi; investigation, Hadis Khosravian Chatroodi; writing-original draft preparation, Hadis Khosravian Chatroodi; writing-Alireza Raheb; visualization, Hadis Khosravian Chatroodi; supervision, Alireza Raheb and Ahmad Heidari; project administration, Alireza Raheb; funding acquisition, Alireza Raheb and Ahmad Heidari. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.” All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

#### **Data Availability Statement**

Data available on request from the authors.

#### **Acknowledgements**

The authors would like to thank Soil Science Department of University of Tehran for providing equipments and Facilities, and Dr. Aida Bakhshi Khorramdareh for her participants of the present study.

#### **Ethical considerations**

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

#### **Conflict of interest**

The author declares no conflict of interest

پایان کارشناسی ارشد